

1.Кириченко І.Г. Сучасні принципи створення засобів механізації дорожньо-будівельних робіт. – К.: УМК В, 1989. – 71 с.

2.Міжгалузева уніфікація й агрегування самохідних машин-знарядь і автотранспорту / За ред. В.В.Бойцова. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 448 с.

Отримано 17.04.2009

УДК 677.72

І.Г.МІРЕНСЬКИЙ, д-р техн. наук

Харківська національна академія міського господарства

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛЕВИХ КАНАТІВ

Обґрунтовано новий підхід вибору параметрів звивки сталок канату на основі втомних досліджень дротів різного діаметра та характеристики міцності. Наведено результати порівняльних випробувань у лабораторних і виробничих умовах дослідних зразків сталок і сталевих канатів, впровадження яких сприяє підвищенню їх стійкості

Обоснован новый подход к выбору параметров свивки прядей каната на основе усталостных испытаний проволок разного типоразмера и прочностной характеристики. Приведены результаты сравнительных испытаний в лабораторных и производственных условиях опытных образцов прядей и стальных канатов, внедрение которых способствует повышению их стойкости.

New approach of rope strands winding parameters choice is grounded on the basis of fatigues tests wire different typesize and durability description. The results of comparative tests are resulted in the laboratory and productions terms of pre-productions models of strands and steel ropes introduction of which is instrumental in the increase of their firmness.

Ключові слова: сталеві канати, довговічність, підйомно-транспортне обладнання, сталки, параметри звивки.

Сталеві канати уявляють собою багатодротовий композит, технічний стан якого суттєво впливає на безвідмовність роботи підйомно-транспортного обладнання різного призначення, зокрема на підприємствах житлово-комунального господарства. Напрацювання його залежить від фізико-механічних характеристик вихідного матеріалу, технології виготовлення та умов експлуатації. Основною причиною виходу з ладу гнучких виробів є руйнування від втомленості їх елементів за рахунок дії сукупності навантажень різного характеру та динамічного коливання всієї системи. Одним із шляхів підвищення довговічності сталевих канатів є правильний вибір параметрів звивки дротів з урахуванням конструкції та режимів експлуатації. Проблема, що розглядається, є багатогранною, вона порушує розгляд комплексу задач, що включає розробку прогресивних конструкцій, визначення раціональних параметрів виготовлення дроту та виробу в цілому, а також створення високоефективного технологічного обладнання.

Основні фундаментальні дослідження, присвячені технології виготовлення сталок канатів з лінійним і точковим дотиком, виконано в

роботі [1], де вказано декілька точок зору щодо визначення параметрів звивки дротів у сталки. Аналіз пропонованих рекомендацій дозволив відзначити, що вони визначені з позиції конструювання гнучких виробів із дроту з низькою границею міцності (1600-1700 МПа) без урахування втомних властивостей високоміцного дроту та технології його виготовлення.

У процесі експлуатації каната на дріт чинить вплив цілий комплекс додаткових періодично діючих напружень: а) нормальні, викликані кінцевим навантаженням; б) згинні, що виникають при переходу каната через направляючі шківів та навівання на барабан; в) контактні, що виникають в місцях торкання каната зі шківом чи барабаном, а також дротів між собою; г) крутильні, викликані крученням виробу; д) динамічні, що виникають в процесі змінення швидкості руху каната. Крім зазначених вище, при звивці каната на дріт діють основні технологічні напруження, в результаті чого він випробує певну деформацію згину в крайніх волокнах. Таким чином, під час експлуатації каната основні й додаткові напруження накладаються одне на одне і створюють сумарні, які за величиною змінюються асиметрично.

З метою вдосконалення наукових основ технології виготовлення та експлуатації сталевих канатів, а також враховуючи світову тенденцію застосування дроту високої міцності для їх виробництва, виконано дослідження вихідного матеріалу різних марок сталі (60 і 80), тимчасового опору розриву (1330-2550 МПа) і технологічних схем виготовлення (патентування, бейнітування та загартування+електровідпуск) на циклічну міцність при асиметричному циклу зміни деформації за часом, які дозволили визначити оптимальну величину деформації згину в крайніх волокнах при максимальній кількості циклів до руйнування.

Випробування проводили на спеціальному лабораторному пристрої, конструкція якого дає можливість здійснювати дослідження міцності на втомлення при асиметричному циклі й задавати різну деформацію зразкам дроту. Відносне уздовження в крайніх волокнах досліджуваних зразків дроту визначали за формулою

$$\varepsilon_{\max(\min)} = \frac{\delta \cdot h_{\max(\min)}}{b^2 + h_{\max(\min)}^2}, \quad (1)$$

де δ – діаметр дроту, мм; $h_{\max(\min)}$ – величина максимального (мінімального) прогину зразка, мм; b – половина бази вимірювального приладу, яка дорівнює 25 мм.

З метою зменшення розкиду результатів випробувань усі зразки канатного дроту, що досліджувалися, бралися з одного мотка. Крім

того, впроваджена система автоматичного вимикання випробувальної установки в момент руйнування зразка. В основу запропонованої системи закладено принцип замикання електричного ланцюга ковзним контактом і вмикання сигналізації з показанням відповідного номера секцій стенда. Вибраний цикл певною мірою імітує характер зміни величини деформації (напруження), яку зазнають елементи каната в процесі експлуатації, та характеризується постійною величиною деформації $\varepsilon_{\text{сер.}}$ і змінною $\varepsilon_{\text{а.}}$. При цьому слід зазначити, що $\varepsilon_{\text{сер.}}$ є саме тією деформацією згину, яку потрібно задавати дроту в процесі звивки його в сталки. Таким чином, цілеспрямованість зазначених втомних випробувань канатного дроту полягає у визначенні залежності між кількістю циклів до руйнування N і величиною деформації $\varepsilon_{\text{сер.}} = (\varepsilon_{\text{max}} + \varepsilon_{\text{min}}) / 2$.

У результаті обробки результатів випробувань на циклічну міцність дослідних зразків канатного дроту за допомогою чисел Чебишева [2] були отримані, виходячи з втомних властивостей, математичні залежності $N = f(\varepsilon_{\text{сер.}})$, які сприяли визначенню оптимальної величини деформації дроту під час звивки. Оскільки випробуванню на втомну міцність при асиметричному циклу зміни деформації за часом зазнавали зразки дроту різного тимчасового опору, з'явилася можливість розглянути функціональну залежність $\varepsilon_{\text{сер.}} = f(\sigma_{\text{тим.}})$. Аналіз отриманих результатів дозволив відзначити, що підвищення характеристики міцності дроту одного типорозміру під час його звивки викликає зменшення величини деформації. Збільшення змісту вуглецю в сталі для одного діаметра дроту сприяє зростанню величини $\varepsilon_{\text{сер.}}$. При міцнісній характеристиці з підвищенням діаметра випробовуваного зразка оптимальна величина деформації згину зростає.

Однак зазначена залежність не враховує технологічні параметри виготовлення вихідного матеріалу сталевих канатів. Такий підхід викликає необхідність введення поправочних коефіцієнтів, що значно ускладнює проведення розрахунків, які плануються. З метою усунення даного недоліку вирішена задача, що дозволяє розглянути вплив на величину деформації крайніх волокон дроту під час виготовлення канатів наступних технологічних факторів: вмісту вуглецю (C , %), марганцю (Mn , %) і сірки (S , %) в сталі, загальних (Q , %) і часткових (q , %) обтиснень, температури аустенізації ($T_{\text{ауст.}}$, $^{\circ}C$), режиму ізотермічного розпаду ($t_{\text{із.}}$, $^{\circ}C$ і $\tau_{\text{із.}}$, хв.), а також типорозміру (δ , мм) зразка, що досліджується. Отже, розглянемо залежність вигляду:

$$\varepsilon_{\text{зв.}} = f(C: Mn: S: Q: q: T_{\text{ауст.}}: t_{\text{із.}}: \tau_{\text{із.}}: \delta). \quad (2)$$

Вибір найкращої форми зв'язку за кожним фактором здійснювався на основі дисперсійного аналізу, при цьому в якості критерія служила залишкова дисперсія. Здійснений аналіз (табл.1) впливу зазначених вище факторів технологічного характеру на величину деформації в крайніх волокнах дроту при виготовленні виробу показав, що найбільший вплив чинить діаметр зразка δ . Приймаючи за основу залежність $\varepsilon_{зв.} = f(\delta)$ і використовуючи метод Брандона, знайдено узагальнене множинне рівняння (табл.2), що відображає залежність величини деформації згину з урахуванням ряду факторів.

Таблиця 1 – Вплив технологічних факторів на величину деформації в крайніх волокнах дроту

Фактор	Вид залежності	Коефіцієнт			Залишкове середньокв. відхилення $\sigma_{зв}$	Кореляційне відношення
		a_0	a_1	a_2		
C	$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2)^{1/3}$	20,6643	-34,7961	19,0644	0,3227	0,2390
Mn	$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2)^{1/2}$	13,3335	-29,9333	20,8605	0,2973	0,4467
S	$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2)^{-1}$	-1,3926	138,9252	-2466,8	0,2993	0,4347
Q	$\ln y = (a_0 + a_1x + a_2x^2)^{-1}$	0,1846	1,2937	-0,9597	0,3211	0,2574
q	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	1,7839	0,3199	-0,5294	0,3283	0,1555
T _{ауст}	$\ln y = a_0 + a_1 \ln x$	0,5947	0,0233	-	0,3324	0,0840
t _{із}	$y = 1/(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	2,0206	-7,2652	8,6014	0,3033	0,4090
$\tau_{із}$	$\ln y = a_0 + a_1 \ln x$	0,6187	-0,0160	-	0,3308	0,0956
δ	$y = \ln(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	29,1369	-44,5253	19,9623	0,0899	0,9627

Таблиця 2 – Загальне множинне рівняння функції $\varepsilon_{зв} = f(C; Mn; S; Q; q; T_{ауст}; t_{із}; \tau_{із}; \delta)$

Фактор	Вид залежності	Коефіцієнт			Коефіцієнт Брандона	Кореляційне відношення	Помилка апроксимації, %
		a_0	a_1	a_2			
C	$y = \ln(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	2,21716	-3,90395	3,0617	$-764 \cdot 10^{-8}$	0,9914	2,25
Mn	$y = \ln(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	1,1075	-0,24375	0,0834			
S	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	-1,82256	131,959	-2375,4			
Q	$y = 1/(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	61,1237	594,203	-995,27			
q	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	0,00912	-0,05278	0,031			
T _{ауст}	$y = 1 - y_{\max} \sin(a_0 + a_1x)$	-3,39334	3,73055	-			
t _{із}	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	-2,18252	10,9417	-13,155			
$\tau_{із}$	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$	0,00174	0,00285	-0,0001			
δ	$y = \ln(a_0 + a_1x + a_2x^2)$	29,1369	-44,5253	19,952			

Враховуючи, що параметри технології виготовлення зразків досліджуваного дроту і хімічний склад сталі змінюються в широкому діапазоні, розглянемо вплив кожного фактора окремо, які входять в функціональну залежність (2). При цьому, всі останні фіксувалися за середніми значеннями їх діапазону змінення, а потім знаходилася сума з чисельними складовими розглядуваного фактора через певний інтервал. Аналіз отриманих графічних залежностей дозволив встановити

наступне. Збільшення змісту вуглецю від 0,63% і більше сприяє зростанню деформацій згину канатного дроту. Зменшення відсоткового змісту марганцю в сталі, а також величини часткових обтиснень викликає зростання деформацій згину. Вміст сірки в сталі до 0,028% позитивно впливає на значення $\varepsilon_{зв.}$ дроту, подальше підвищення її вмісту справляє негативну дію. Зростання загальних обтиснень в процесі виготовлення канатного дроту до 68,65%, а також від 72,89% і вище сприяє збільшенню деформації при звивці дротів у сталку. Вплив температури і часу ізотермічного розпаду на значення $\varepsilon_{зв.}$ адекватний, при цьому із зростанням розглядуваних параметрів до 410 °C і 13,6 хв. величина $\varepsilon_{зв.}$ підвищується. Збільшення діаметра канатного дроту від 1,3 до 1,8 мм і температури аустенізації його заготовки викликає зростання деформації.

Підтвердженням отриманих результатів досліджень на втомленість з асиметричним циклом щодо вибору оптимальної величини деформації згину в крайніх волокнах дроту при звивці його в сталку стало виготовлення дослідних зразків сталок діаметром 7,0 мм типа ЛТ-3 конструкції 1+6/6+12 з дроту, отриманого за технологіями патентування і бейнітування і границею міцності 1730 і 2260 МПа відповідно. При розробці вказаної конструкції закладали типорозміри дротів в шарах, які б забезпечили проміжок між ними і щільне прилягання шару до шару, а також величини деформацій згину елементів першого шару на підставі експериментальних досліджень.

Розрахунок технологічних параметрів виготовлення дослідних сталок здійснювали за відомими залежностями:

$$\operatorname{tg} \alpha_{зв.} = \frac{\pi d_{сер}}{h_{ст}}; \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta \sin^2 \alpha_{зв.}}{d_{сер}}; \quad (4)$$

$$h_{ст} = k_{ст} \cdot d_{ст}, \quad (5)$$

де $\alpha_{зв.}$ – кут звивки концентричного ряду сталки, град.; $d_{сер}$ – середній діаметр розглядаємого концентричного ряду дротів елемента крученого виробу, мм; $h_{ст}$ – крок звивки сталки, мм; $d_{ст}$ – зовнішній діаметр сталки, мм; $k_{ст}$ – кратність звивки.

Згідно з виразами (3)–(5) встановлено наступні оптимальні параметри виготовлення дослідних зразків сталок:

- з патентованого дроту

$$h_{ст} = 46,71 \text{ мм}; \alpha_{вн.} = 11^\circ 35'; \alpha_{зап.} = 15^\circ 35'; \alpha_{зов.} = 20^\circ 48'; k_{ст} = 6,72;$$

- з дроту, виготовленого шляхом бейнітування

$$h_{\text{ст}} = 48,88 \text{ мм}; \alpha_{\text{вн}} = 11^{\circ}05'; \alpha_{\text{зап.}} = 14^{\circ}39'; \alpha_{\text{зов}} = 19^{\circ}39'; k_{\text{ст}} = 7,12.$$

В зазначених параметрах $\alpha_{\text{зап.}}$ – кут звивки дротів заповнення.

З метою зняття технологічних напружень в процесі виготовлення високоміцних сталок з оптимальними параметрами їх елементи підлягали попередній деформації за допомогою розробленого трьохдискового технологічного пристрою, при цьому відхилення середнього диска складало 20 мм. Крім того, для порівняльної оцінки було виготовлено зразки сталок з дротів, виготовлених шляхом бейнітування, за заводською технологією ($k_{\text{ст}} = 8,3$).

Порівняльні випробування дослідних зразків сталок з різними параметрами звивки здійснювали на спеціальній пробіжній машині, яка дозволяла відтворювати умови роботи ділянки сталки, що зазнає перегину на шківу з одночасною дією напруження розтягу. Випробування здійснювали до повного руйнування зразка при запасі міцності, що дорівнював 6,5, і відношенні діаметрів шківу до сталки – 27,1. У якості критерія їх стійкості було прийнято напруцювання [3]:

$$A = k \frac{NQ}{1000p}, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від типу підйому (для двохкінцевих підйомів $k = 1/2$, а для підйомів з противагою – $k = 1$; N – кількість відпрацьованих циклів до руйнування зразка; Q – кінцевий вантаж, Н; p – погонна вага сталки каната, Н/м.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що працездатність високоміцних сталок ($\sigma_{\text{тим}} = 2260$ МПа) з рекомендуємих параметрами звивки ($k_{\text{ст}} = 7,12$) була вище на 24% порівняно із зразками, виготовленими за заводськими параметрами ($k_{\text{ст}} = 8,3$), і на 60% – з патентованого дроту за вищезазначеною технологією. Виготовлення сталок з оптимальними параметрами звивки патентованого канатного дроту приводить до підвищення його напруцювання на 55%. Зростання розривного опору за рахунок застосування дроту високої границі міцності та однієї технологічної схеми виготовлення (заводської) приводить до збільшення працездатності на 30%. Таким чином, виконані лабораторні випробування сталок з різними параметрами звивки показали, що величини деформації згину в крайніх волокнах дроту, які запропоновані на основі випробувань на втомлення при асиметричному циклі зміни за часом, сприяють підвищенню напруцювання елементів сталевих канатів. Виготовлення сталок з високою міцнісною характеристикою потрібно здійснювати з більш подовженим кроком звивки порівнянних елементами канатів із патентованого дроту.

З метою оцінки стійкості в промислових умовах і вірогідності запропонованих технічних рішень було виготовлено за заводською технологією дослідні канати діаметром 22,0 мм конструкції 6х25 +о.о. із сталок з оптимальними параметрами та кратністю звивки $k_{\text{кан}}=6,5$. В процесі звивки канатів високого розривного опору з сталок, дріт яких отримано шляхом бейнітування, задавали їх підкрутку (2%), а також попередню деформацію з відхиленням середнього диска на 23 мм. Запропонована технологія дозволила виготовити високоміцний канат щільної звивки, в якого пружня віддача майже повністю відсутня. При цьому агрегатне зусилля його було вище на 22,6% порівняно з виробами, виготовленими за еталонною технологічною схемою.

Результати промислових випробувань дослідних канатів як підйомних на екскаваторах Е-10111 показали їх підвищене напрацювання порівняно з серійними. Критерієм оцінки був обсяг переробленого ґрунта. Так, середнє напрацювання канатів із патентованого дроту і оптимальними параметрами звивки було в 1,52 рази вище, ніж стандартних. Перероблений високоміцними виробами з бейнітованого дроту ($\sigma_{\text{тим}}=2260$ МПа) обсяг ґрунта становив 27,4 тис. м³, що перевищує на 83% аналогічний показник виробів серійного виробництва.

Таким чином, проведені дослідження впливу параметрів звивки дроту на ресурс сталевих канатів добре погоджуються з даними, отриманими в лабораторних умовах. Підтверджена вірогідність запропонованого з позиції руйнування металу від втомлення підхода вибору оптимальних параметрів звивки дротів. Отримані аналітичні залежності й розроблені рекомендації сприяють створенню нових наукових основ в області конструювання, технології виготовлення та практики експлуатації сталевих канатів різного призначення, зокрема для підйомно-транспортних засобів. Реалізація розроблених теоретичних положень дає можливість підвищити їх якість і довговічність.

1.Сергеев В.Т. Стальные канаты. – К.: Техніка, 1986. – 307 с..

2.Ефимова М.Р., Петрова Е.В., Румянцев В.Н. Общая теория статистики. –М.: ИНФРА-М, 1998. – 416 с.

3.Григоров О.В., Петренко О.В. Вантажопідйомні машини. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – 299 с.

Отримано 29.09.2009